Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain

Research Article

Reza Jahanshahi,[1] Masoomeh Navardi[2], Naser Asadi[3], Mohammad Reza Mirbalouchzehi[4]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.89496.1318

1. Introduction

Considering the global limitation of water resources, studying water quality is essential to identify and utilize these resources as efficiently as possible. The chemical composition of groundwater is influenced by numerous factors, including the chemical properties of rainwater and surface water, the geological and mineralogical structures of the aquifer and watershed, subsurface geochemical processes within the aquifer, and the groundwater retention time.

The Iranshahr Plain, covering an area of 9,436.6 km², is situated in the hot and arid region of southeastern Iran in Sistan and Baluchestan Province. Due to the fine-grained texture of the Iranshahr Plain, groundwater flow is reduced, leading to an increase in groundwater retention time. This extended retention allows for chemical reactions and the dissolution of soluble deposits in the groundwater.

In terms of agricultural activity, the Iranshahr region includes approximately 30,000 hectares of agricultural land. The primary fertilizers used in the area are urea and superphosphate. Therefore, studying the chemical evolution of the region's water resources—considering the expansion of agricultural lands and the indiscriminate extraction of groundwater—along with the reduction in precipitation in the Iranshahr area, is crucial. Such research can help determine the optimal physical and chemical quality of water for various uses and assess the degree of quality degradation.

2. Method

In the Iranshahr Plain, qualitative data were collected from 27 groundwater sampling sites (wells and qanats), time series data from 50 observation wells on water table levels, and data on pumping durations and groundwater extraction rates from the aquifer. These data were obtained from the Sistan and Baluchestan Regional Water Company.

This study utilized average quantitative and qualitative data to evaluate and discuss the region's groundwater conditions. The research focused on analyzing flow direction maps, topography, ion dispersion, groundwater types, EC (electrical conductivity) and pH levels, aquifer withdrawal rates, Piper mineral saturation index charts, changes in water levels, and results from factor and cluster analyses.

3. Results

The lag time between rainfall and changes in the water table has increased around Iranshahr and Bampur cities, as well as in observation wells farther from the river. Groundwater withdrawal is higher in downstream areas compared to upstream regions. Three groundwater types—Na-Cl, Na-HCO_3, and Na-SO_4—are observed in the plain. Electrical conductivity (EC) values increase from approximately 649 to 7,047 µS/cm from the eastern to the western parts of the region, while pH levels decrease in the same direction. As groundwater withdrawal intensifies, water table levels decline, leading to a simultaneous increase in electrical conductivity and a reduction in groundwater quality (Fig. 1).

Most groundwater samples in the region are supersaturated with respect to calcite and dolomite, which tend to precipitate. However, the groundwater remains undersaturated with respect to anhydrite, gypsum, and halite, indicating a tendency to dissolve these minerals.

*Manuscript received August 20, 2024, Revised September 1, 2024, Accepted November 12, 2024.

[1] Associate Professor of Hydrogeology, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.
Email: rezajahanshahi@ut.ac.ir ,
[2] M. Sc Student of Hydrogeology, Geology Department, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
[3] Assistant Professor of Hydrogeology, Geology Department, Faculty of Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
[4] Ph.D of Chemistry, Sistan and Baluchestan Water and Wastwater Co., Iran.

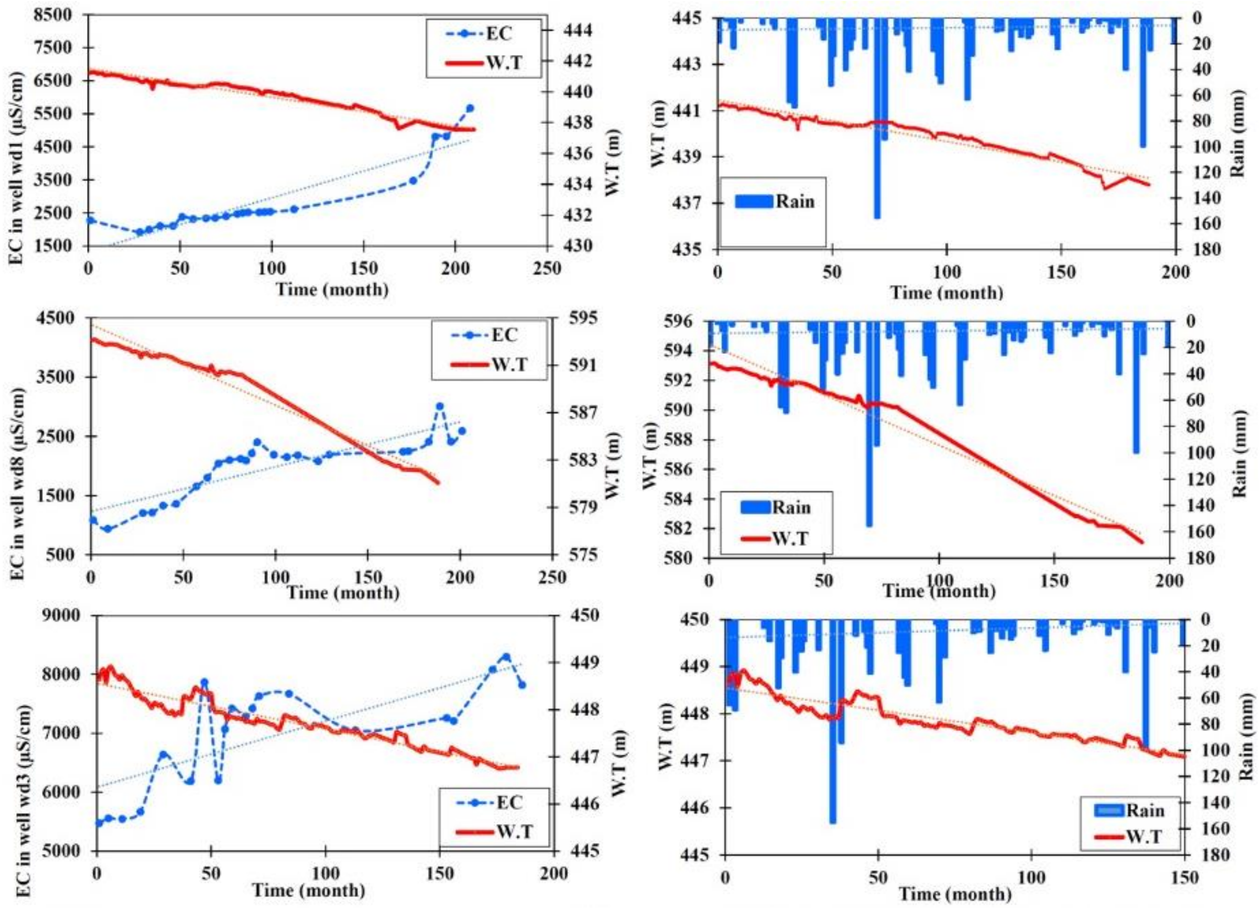


Figure. 1. Time variation of EC, rainfall and water table in the study area.

4. Conclusion

In the study area, the iso-potential map and the direction of the groundwater flow showed that a large part of the groundwater from the carbonate unit rocks in the east of the plain entered the aquifer and moved to the west of the area, and during this movement, the quality of the groundwater in the area decreased. The hydrochemical evolution of the groundwater showed that the incoming groundwater type was carbonated in the east of the region and eventually became the dominant type of Na-Cl. The location of exploitation wells with a higher pumping rate and high electrical conductivity in the center and west side of the aquifer has caused a drop in the water table and a decrease in the quality of groundwater. Based on the lag time values between precipitation and its effect on the groundwater, it can be said that the direction of the groundwater flow mainly follows the topography of the region and in urban areas due to the reduction of permeability and high harvesting and in the downstream of the aquifer due to finer particles. Finally, it can be said that natural geological factors and groundwater harvesting are the factors influencing the quality of the ground water in the aquifer.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت ایرانشهر*

مقاله پژوهشی

رضا جهانشاهی [۱]   معصومه نوردی [۲]   ناصر اسدی[۳]   محمدرضا میربلوچ زهی[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.89496.1318

چکیده *در این تحقیق به بررسی هیدروشیمی و کیفیت منابع آب زیرزمینی در ۲۷ محل از چاه‌های عمیق، نیمه‌عمیق و قنوات در دشت ایرانشهر، استان سیستان و بلوچستان، پرداخته شده است. طبق نتایج و یافته‌های این تحقیق ارتفاع دشت از شرق به غرب کاهش یافته و جهت حرکت آب زیرزمینی از شرق به سمت غرب و تقریبا موازی مسیر رودخانه فصلی منطقه می‌باشد. تأخیرتأخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی نشان می‌دهد در محدوده شهر ایرانشهر و بمپور و همچنین در چاه‌های مشاهده‌ای دورتر از رودخانه این تأخیرتأخیر زمانی افزایش یافته است. میزان برداشت از آبخوان در مناطق پایین دست بیشتر از بالادست می باشد. در آب زیرزمینی دشت سه نوع تیپ آب کلروسدیک، بی‌کربنات سدیک و سولفات سدیک مشاهده می‌شود. میزان EC از حدود ۶۴۹ تا ۷۰۴۷ میکروموس بر سانتی‌متر از سمت شرق به غرب منطقه افزایش می‌یابد، در حالی که میزان pH از شرق به غرب کاهش پیدا می‌کند. هم‌زمان با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از آبخوان، روند افزایش هدایت الکتریکی و کاهش کیفیت در آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع هستند و این کانی‌ها تمایل به ته نشست دارند اما نسبت به انیدریت، ژیپس و هالیت تحت اشباع هستند و آب زیرزمینی تمایل به حل کردن این کانی‌ها دارد. به طور کلی می‌توان گفت که فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی واحدهای زمین‌شناسی و برداشت از آبخوان می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی آب زیرزمینی، اندیس اشباع کانی، تأخیر زمانی، هیدروشیمی.

Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain

Reza Jahanshahi, Masoomeh Navardi, Naser Asadi, Mohammad Reza Mirbalouchzehi

Abstract *This research investigated the hydrochemistry and quality of the groundwater resources in the Iranshahr plain, Sistan and Baluchestan Province, South East of Iran. Major ions, electrical conductivity and pH of groundwater have been studied in 27 points of deep, semi-deep wells and qanats in the study area. According to the results, the topographic elevation of the plain decreased from east to west and the direction of ground water flow was from east to west too (almost parallel to direction of the seasonal river in the study area). The lag time between rainfall and water table showed that around of Iranshahr and Bampur cities and observation wells far from river were increased. In the of plain groundwater extraction amount in the downstream of plain was more than upstream. There were three types of Na-Cl, Na-HCO3, and Na-SO4 in the groundwater of study area. The amount of EC increased from about 649 to 7047 µS/cm from east to west of plain, while the pH decreases in this direction. Simultaneously with the decrease in the level of water table due to extraction from the aquifer, the process of increasing the electrical conductivity and decreasing the quality of the groundwater had happened. Most of the groundwater samples in the study area were supersaturated with respect to calcite and dolomite (tend to precipitate), while they were undersaturated with respect to anhydrite, gypsum, and halite (tend to dissolution). Generally, geology setting and groundwater are factors effecting the quality groundwater.*

Key words Groundwater, Hydrochemistry, Lag time, Mineral saturation index.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۵/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۸/۲۲ می‌باشد.

Email: rezajahanshahi@ut.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده زمین شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۳) استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

(۴) دکتری شیمی، شرکت آب و فاضلاب استان سیستان و بلوچستان.

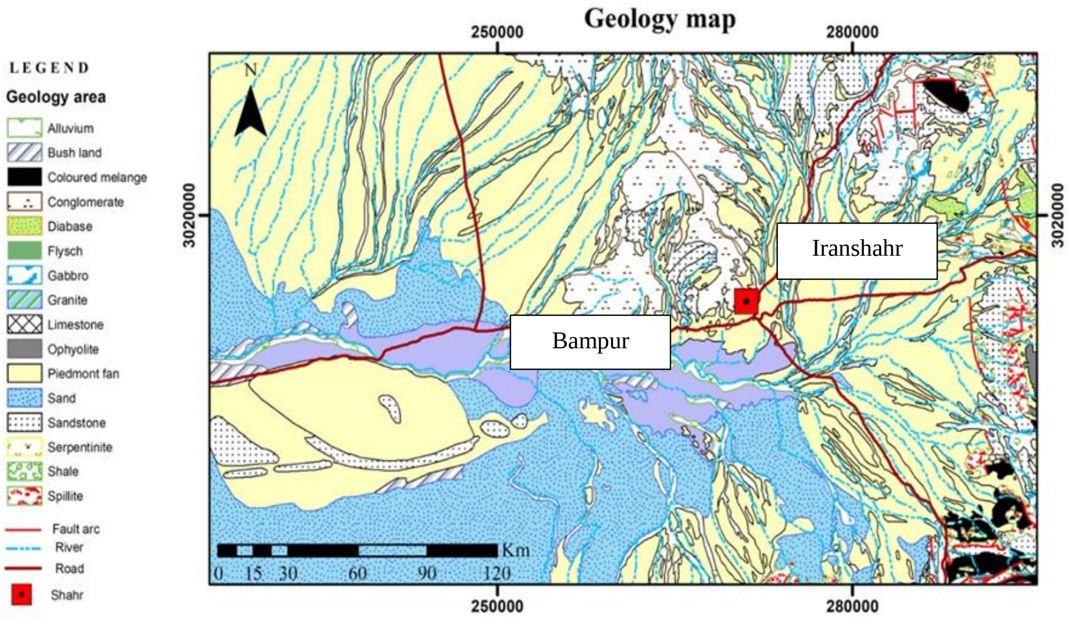
مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند. با توجه به محدودیت منابع آب در کل دنیا، مطالعه کیفیت آب در جهت شناسایی و استفاده هر چه بهتر آن کمک می‌کند. ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی توسط فاکتورهای زیادی کنترل می‌شود که شامل ترکیب شیمیایی باران و آب‌های سطحی، ساختارهای زمین‌شناسی و کانیایی آبخوان و حوضه آبریز و فرایندهای ژئوشیمیایی زیرسطحی در آبخوان و زمان ماندگاری آب می‌باشد. تغییرات زمانی در منشأ و ترکیبات آب تغذیه کننده، فاکتورهای انسانی و هیدرولوژیکی می‌تواند باعث تغییرات پریودیک در کیفیت آب زیرزمینی شود. افزایش اطلاعات از تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی در مناطق خشک، منجر به شناخت بیشتر سیستم هیدروشیمیایی و مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی می‌شود [1] و [2]. در خصوص بررسی آب‌زمین‌شیمی، تکامل هیدروژئوشیمیایی و عوامل مؤثر بر کیفیت منابع آب پژوهش‌های زیادی در سطح دنیا انجام شده است. بر مبنای پژوهش انجام شده در دشت سمنان، در این دشت ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی به وسیله نفوذ آب شور رودخانه آبگرم، انحلال نمک‌ها، زمان ماندگاری، هوازدگی سیلیکات‌ها، تبادل کاتیونی، تبخیر و آب برگشت کشاورزی کنترل می‌شود [2]. مطالعه‌ای با هدف بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و طبقه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی دشت هرزندات انجام شده است [3]. نتایج حاکی از آن بود که اغلب آب‌های کیفیت پایین از نظر شرب، کشاورزی و صنعت در بخش‌های مرکزی و شمالی دشت قرار دارند و از لحاظ مصارف صنعتی برخی از منابع آب دارای خاصیت رسوب‌گذاری و بخشی نیز خورنده هستند. بر اساس ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه معدنی اردستان، استان اصفهان [4] کیفیت آب زیرزمینی در بیشتر این منطقه برای کشاورزی و آشامیدن مناسب است؛ اما، با توجه به پتانسیل تولید زهاب اسیدی در اثر اکسایش کانی‌هایی همانند پیریت در هنگام استخراج ماده معدنی در آینده، ممکن است کیفیت منابع آب اردستان تحت تأثیر قرار گیرد. در خصوص تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود [5] واکنش آب ـ سنگ، تبخیر و نفوذ آب شور دریای خزر از مهم‌ترین عوامل کنترل کننده شیمی آب رودخانه تشخیص داده شده است. در تحقیقی دیگر در آبخوان حسن آباد شهرستان نیریز [6] احتمال داده می‌شود با توجه به کاهش بارندگی و زمان ماندگاری بالای آب‌های زیرزمینی در اعماق زیاد، افزایش هدایت الکتریکی و کاهش کیفیت آب منطقه به خصوص در چاه‌های شمال و شمال غربی ایجاد شده است. بر اساس پژوهش انجام شده در خصوص فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی بر خصوصیات هیدروشیمیایی آب زیرزمینی در دشت گرمسار فرایندهای اصلی دخیل در شیمی آب‌های زیرزمینی عبارت بودند از انحلال در طول مسیر جریان، تبخیر، برهمکنش آب سنگ، تبادل یونی و فرایندهای اختلاط [7]. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آبخوانی کم‌عمق در منطقه‌ای نیمه‌خشک واقع در شمال غربی الجزایر و شناسایی عوامل اصلی حاکم بر کیفیت آب زیرزمینی بررسی شده است و مشخص شد که هوازدگی سنگ‌های کربناته و سیلیکات‌ها، انحلال و تبخیر هالیت و تبخیر و تبادل کاتیونی عوامل طبیعی تأثیرگذار بر شیمی آب منطقه هستند [8].

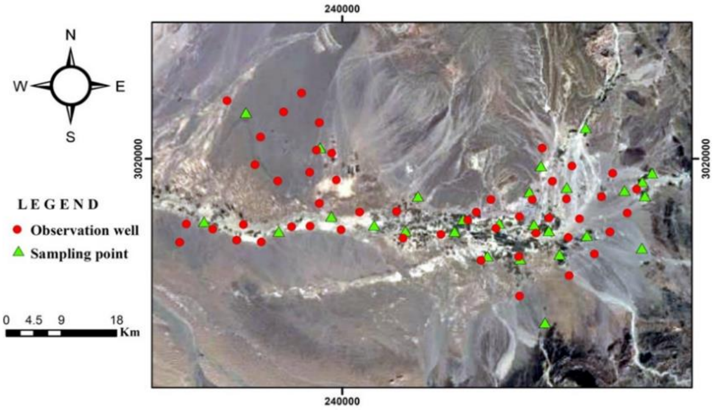
دشت ایرانشهر با وسعت ۹۴۳۶/۶ کیلومتر مربع در ناحیه گرم و خشک جنوب شرق ایران در استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. به علت ریزدانه بودن بافت دشت ایرانشهر سرعت حرکت آب‌های زیرزمینی کاهش پیدا کرده و منجر به افزایش زمان ماندگاری آب زیرزمینی می‌شود. بنابراین فرصت زیادی برای انجام واکنش‌های شیمیایی و انحلال نهشته‌های قابل انحلال در آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. منطقه ایرانشهر از لحاظ فعالیت‌های کشاورزی دارای حدود سی هزار هکتار اراضی کشاورزی است و کود مصرفی در کشاورزی منطقه عمدتا اوره و سوپرفسفات‌تریپل است. بنابراین بررسی تکامل شیمیایی منابع آب منطقه با توجه به گسترش اراضی کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی منطقه با توجه به کاهش نزولات جوی در محدوده شهر ایرانشهر، می‌تواند در تعیین کیفیت مطلوب فیزیکی و شیمیایی آب در راستای نوع استفاده و ارزیابی میزان کاهش کیفیت منابع زیرزمینی، اطلاعات مفیدی در اختیار قرار دهد.

منطقه مورد مطالعه

دشت ایرانشهر، بخشی از حوزه آبریز هامون ـ جازموریان می‌باشد که در شرق این حوزه قرار گرفته است. در واقع این محدوده شامل یک دشت می‌باشد که از شمال شرق به کارواندر و ایرندگان، و از غرب و شمال‌غرب به بزمان ـ سردگال، از جنوب‌غرب به اسپکه ـ مسکوتان، از جنوب به قصرقند و راسک ـ سرباز و از شرق به زابلی محدود می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع در دشت به ترتیب ۴۱۹ و ۱۰۱۳ متر و در ارتفاعات ۴۹۷ و ۲۲۲۲ متر می‌باشد [9]. متوسط بارندگی سالانه در دشت ایرانشهر ـ بمپور ۱۰۱/۳۳ میلی‌متر بر اساس ایستگاه باران‌سنجی دامن ثبت شده است. در محدوده مطالعاتی ایرانشهر رودخانه‌های کنارو، بمپور و دامن جریان دارند. در منطقه ایرانشهر از نظر زمین‌شناسی می‌توان سری سنگ‌های رسوبی اواخر دوران دوم تا عهد حاضر و همچنین بیرون‌زدگی‌هایی از سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی را در منطقه مشاهده نمود (شکل ۱). سنگ‌های آهکی تیره کرتاسه شامل یکسری سنگ‌های آهکی تیره رنگ می‌باشد که فرسودگی نسبتا زیادی را تحمل کرده‌اند، که گسترش آنها بیشتر در قسمت جنوب شرقی منطقه در ارتفاعات جاده ایرانشهر به سرباز می‌باشد. سنگ‌های فلیش ائوسن با تناوبی از شیل و مارن و ماسه سنگ، مهم‌ترین گسترش‌های واحد فلیش در شمال ایرانشهر به حساب می‌آید. واحد رسوبی الیگوسن تناوبی از آهک دولومیتی و مارن، همراه لایه‌های ضخیم کنگلومرایی می‌باشد، در شمال غربی و همچنین در شمال ایرانشهر در غرب ارتفاعات دامن دیده می‌شود. رسوبات میوسن در این ناحیه دارای مورفولوژی مشخصی هستند و همانند سری رسوبات میوسن ایران مرکزی آثاری از رخساره تبخیری (گچ و نمک) در تناوب رسوب‌گذاری دیده می‌شود. رسوبات آبرفتی که اکثرا شامل ماسه، قلوه سنگ و رس می‌باشند و بسیار نفوذپذیر بوده و کلیه حواشی دشت به صورت مخروط افکنه‌های به هم پیوسته قابل رؤیت هستند و پهنه وسیعی در منطقه از لحاظ مناطق تغذیه‌ای سفره آبدار منطقه را شامل می‌شوند. آبخوان اصلی دشت ایرانشهر که حاصل فرسایش ارتفاعات بوده و از نوع آبخوان آزاد می‌باشد، در حال حاضر با ترکیبی از قلوه سنگ، شن، ماسه، سیلت و رس تشکیل یافته است. منابع آب زیرزمینی منطقه چاه و قنات می‌باشند.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲ نقشه پراکندگی نقاط نمونه‌برداری کیفی و اندازه‌گیری سطح ایستابی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

روش کار

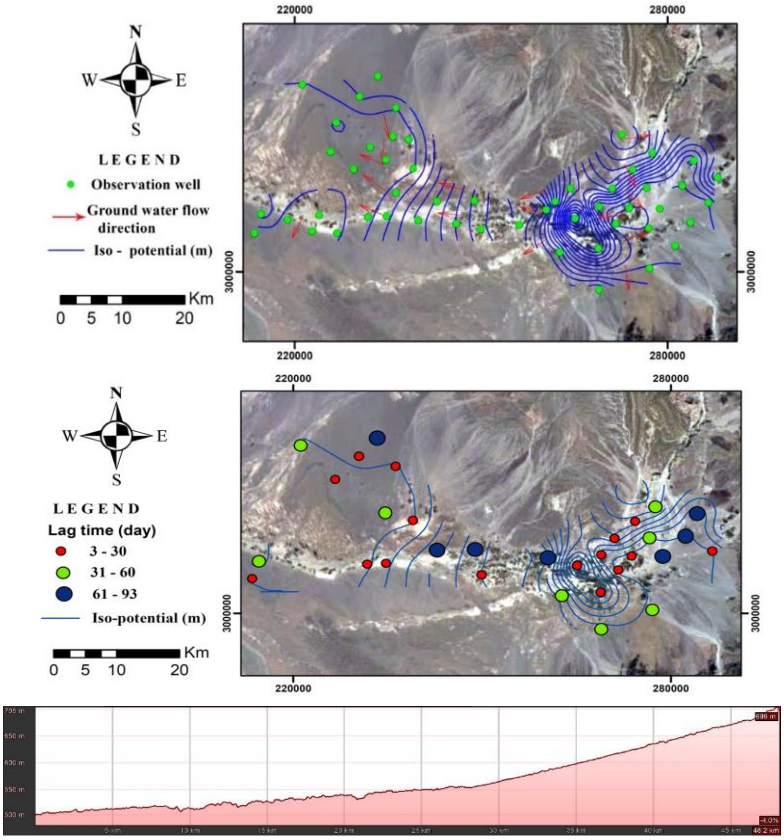
در دشت ایرانشهر داده‌های کیفی مربوط به ۲۷ محل نمونه‌برداری (چاه و قنات) از آب زیرزمینی (شکل ۲)، داده‌های زمانی تغییرات سطح ایستابی در ۵۰ حلقه چاه مشاهده‌ای (شکل ۲) و میزان زمان پمپاژ و برداشت آب زیرزمینی از آبخوان از شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان اخذ شده است. در این تحقیق از میانگین داده‌های کمی و کیفی سال آبی ۱۴۰۰ برای ارزیابی و بحث پیرامون منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. مبنای پژوهش بررسی نقشه جهت جریان، توپوگرافی، پراکندگی یون‌ها، تیپ آب زیرزمینی، میزان EC و pH، میزان برداشت از آبخوان، نمودار اندیس اشباع کانی‌ها، پایپر، تغییرات سطح ایستابی، تحلیل عاملی و خوشه‌ای می‌باشد.

یافته‌ها و تجزیه و تحلیل

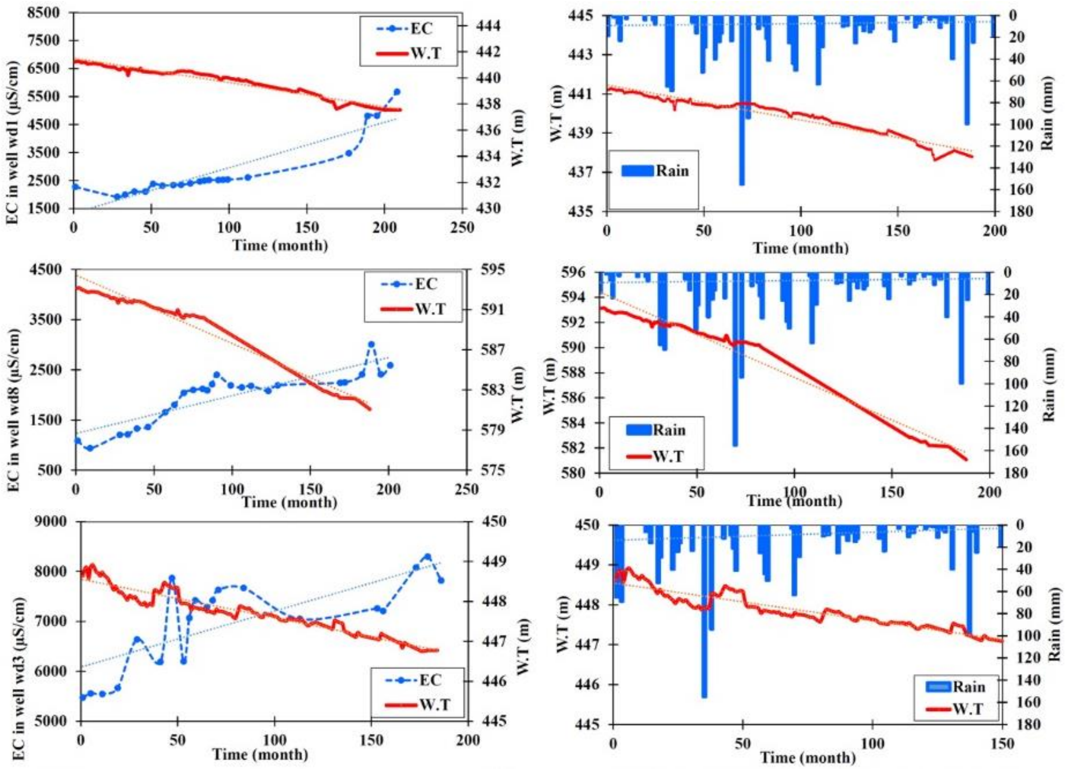
سطح ایستابی و جریان آب زیرزمینی

بر اساس نقشه هم‌ارزش تراز سطح ایستابی و جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ایرانشهر (شکل ۳) مشاهده می‌شود آب زیرزمینی به طور کلی از سمت شرق به طرف غرب جریان دارد که تقریبا موازی مسیر رودخانه فصلی (رودخانه بمپور) منطقه می‌باشد. علاوه بر آن دیده می‌شود در محدوده دو شهر ایرانشهر و بمپور مخروط افت بزرگی (خطوط بسته) در سطح ایستابی ایجاد شده است که نشان از برداشت آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری بوده که یک نوع چاه میدانی را ایجاد نموده است. همچنین مشاهده می‌شود شیب هیدرولیکی سطح ایستابی از شرق دشت به سمت غرب کاهش می‌یابد؛ که می‌تواند به تغییرات توپوگرافی سطح زمین، تغییرات اندازه و جنس ذرات آبخوان و تأثیر تغییرات مکانی، زمانی میزان برداشت از آب زیرزمینی و یا عواملی مانند تغذیه در بالادست [11,10] مربوط باشد. سطح مقطع ترسیم شده از توپوگرافی سطح زمین در (شکل ۳) نشان می‌دهد توپوگرافی نیز از شرق به سمت غرب کاهش می‌یابد و لذا کاهش شیب هیدرولیکی در این جهت امری طبیعی خواهد بود. به منظور بررسی واکنش آب زیرزمینی در دشت ایرانشهر به تغییرات بارش، اقدام به محاسبه تأخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی شده است. در شکل (۳) پراکندگی تأخیر زمانی نشان می‌دهد در محدوده شهر ایرانشهر و بمپور به دلیل کاهش نفوذپذیری سطح زمین در اثر توسعه شهرنشینی (مناطق با پوشش سیمان، آسفالت و ایزوگام) تأخیر زمانی بین نفوذ بارش و اثر آن در افزایش تراز سطح ایستابی، افزایش یافته است. همچنین در چاه‌های مشاهده‌ای دورتر از رودخانه این تأخیر زمانی نیز افزایش یافته است.

نمودار تغییرات زمانی سطح ایستابی تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای، بارش و هدایت الکتریکی آب زیرزمینی مربوط به چاه‌های بهره‌برداری منطقه مورد مطالعه از سال ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰ در شکل (۴) نشان داده شده است. در میزان تغییرات زمانی بارش روند فصلی مشاهده می‌شود اما روند کاهشی یا افزایش طی این سال دیده نمی‌شود. در حالی که روند کاهشی سطح ایستابی در دشت ایرانشهر مشاهده می‌شود. همچنین در این شکل دیده می‌شود هم زمان با کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در اثر برداشت از آبخوان، روند افزایش هدایت الکتریکی (افزایش شوری) و یا کاهش کیفیت آب زیرزمینی (احتمالا در اثر استخراج آب زیرزمینی در اعماق بیشتر با زمان ماندگاری طولانی‌تر) نیز اتفاق افتاده است.



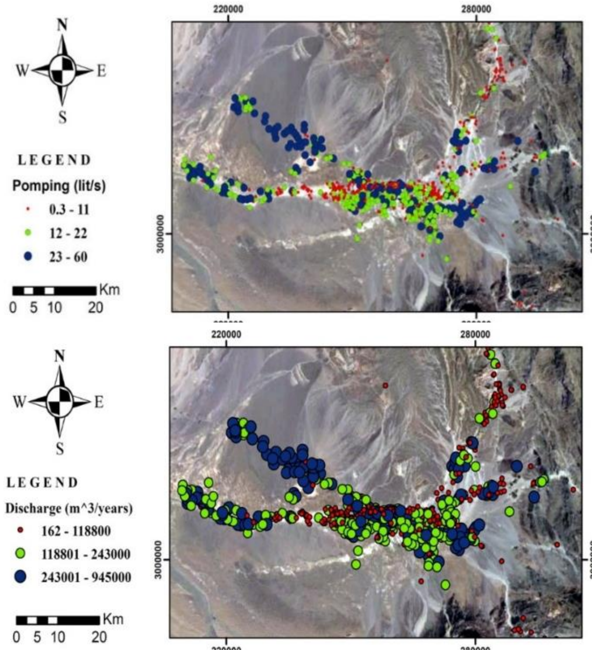
شکل ۳ خطوط هم‌تراز سطح ایستابی و جریان آب زیرزمینی در سال ۱۴۰۰، سطح مقطع توپوگرافی و نقشه پراکندگی تأخیر زمانی بین بارش و سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴ نمودار تغییرات زمانی هدایت الکتریکی، بارش و سطح ایستابی در منطقه مورد مطالعه

خصوصیات برداشت از آبخوان

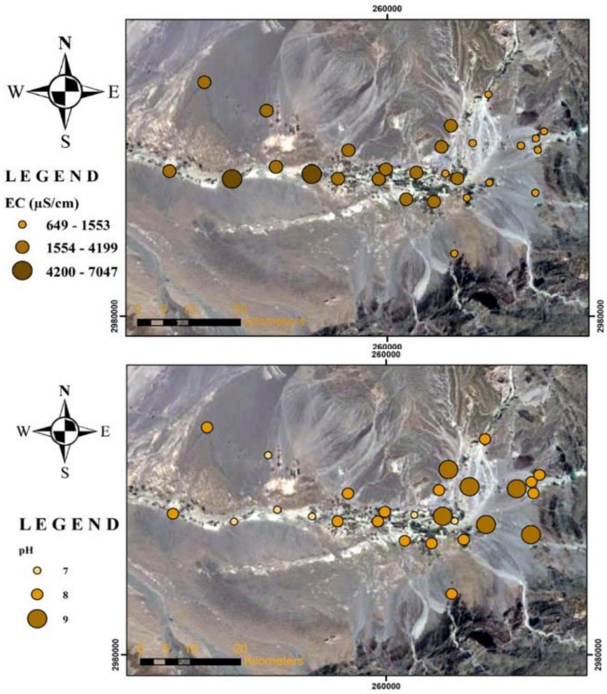
نقشه پراکندگی مقدار نرخ پمپاژ و تخلیه سالیانه در شکل (۵) ارائه شده است و مشاهده می‌شود که در مناطق پایین‌دست میزان برداشت از آبخوان افزایش یافته است. به عبارت دیگر از شرق به غرب دشت، حجم استخراج آب زیرزمینی بیشتر می‌شود.



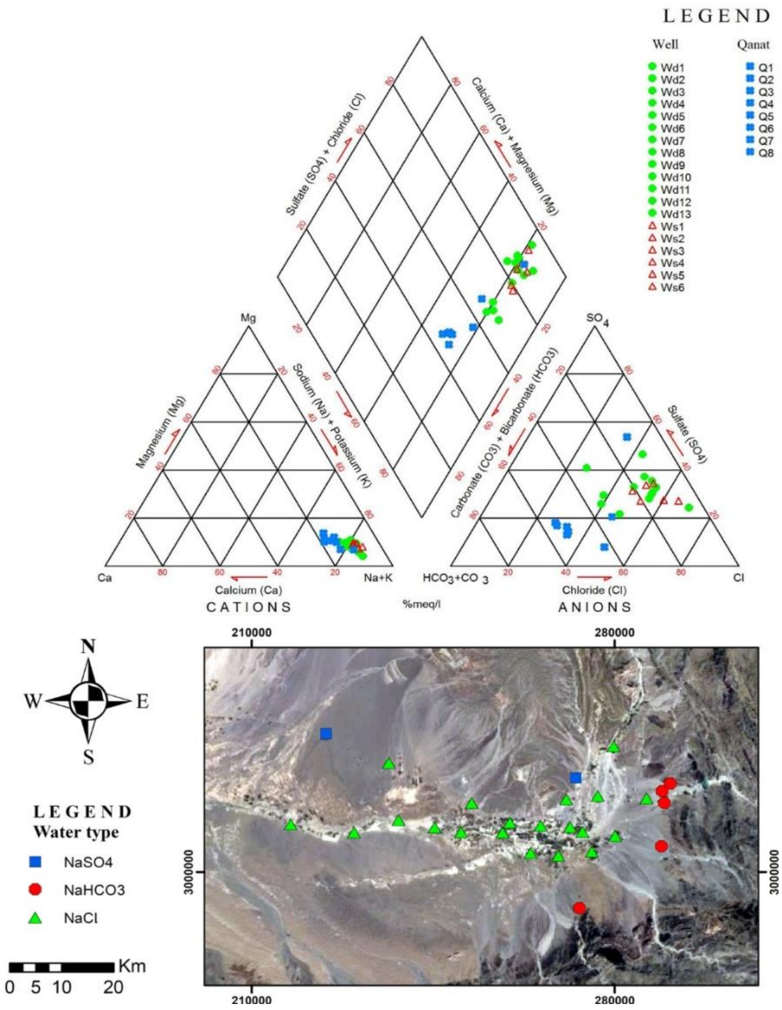
شکل ۵ نقشه پراکندگی نرخ پمپاژ و تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه

آب‌زمین‌شیمی

بر اساس داده‌های کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، میزان هدایت الکتریکی در منابع آب زیرزمینی بین ۶۴۹ تا ۷۰۴۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. نقشه توزیع پراکندگی هدایت الکتریکی (شکل ۶) نشان می‌دهد که در قسمت شرق منطقه میزان هدایت الکتریکی کم است و در نواحی مرکزی و غرب منطقه میزان هدایت الکتریکی افزایش پیدا کرده است که تقریبا با جهت جریان آب زیرزمینی منطبق می‌باشد. میزان pH در آب‌های زیرزمینی منطقه بین ۷/۲ تا ۸/۱ متغیر است و بیشترین میزان آن در قسمت شرق منطقه دیده می‌شود و به سمت غرب منطقه مورد مطالعه مقدار آن کاهش پیدا یافته است که احتمالا به دلیل دور شدن از واحدهای کربناته سمت شرق منطقه باشد (شکل ۶). بر اساس نمودار پایپر (شکل ۷) سه نوع تیپ آب کلروسدیک، بی‌کربنات‌سدیک و سولفات‌سدیک در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. موقعیت سه نوع آب بر روی منطقه مورد مطالعه (شکل ۷) بیشتر نمونه‌ها از نوع کلروسدیک می‌باشد. نمونه آب بی‌کربنات‌سدیک در آب قنوات خارج شده از مخروطه افکنه‌ها و در غرب (بالادست) و جنوب منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. نوع آب سولفات‌سدیک فقط در دو محل مشاهده می‌شود لذا در منطقه مورد مطالعه گسترش چندانی ندارد.



شکل ۶ نقشه پراکندگی EC و pH در منابع آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

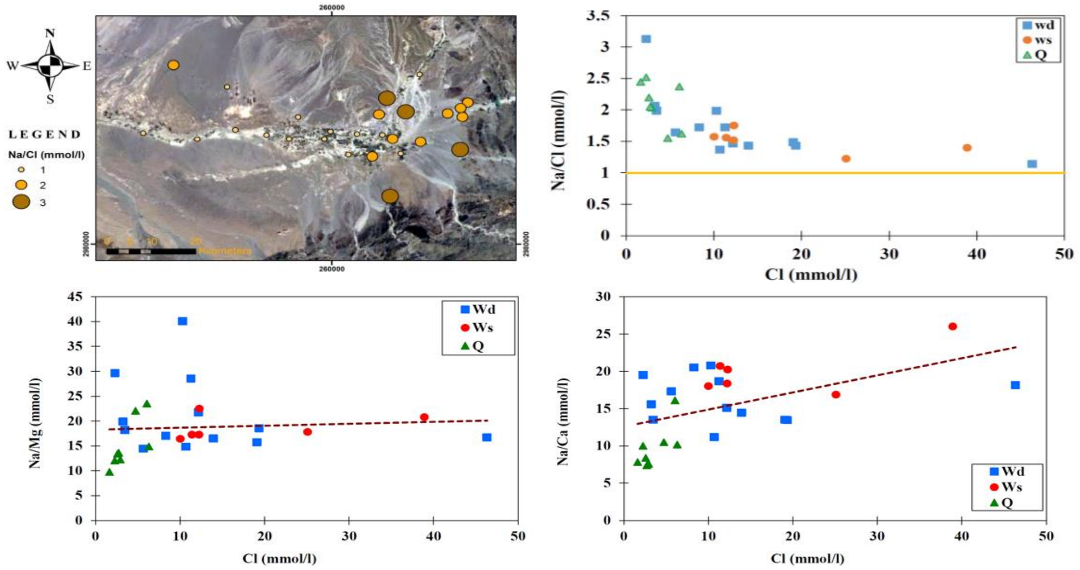


شکل ۷ نمودار پایپر منابع آب زیرزمینی و نقشه پراکندگی نوع آب در منطقه مطالعاتی

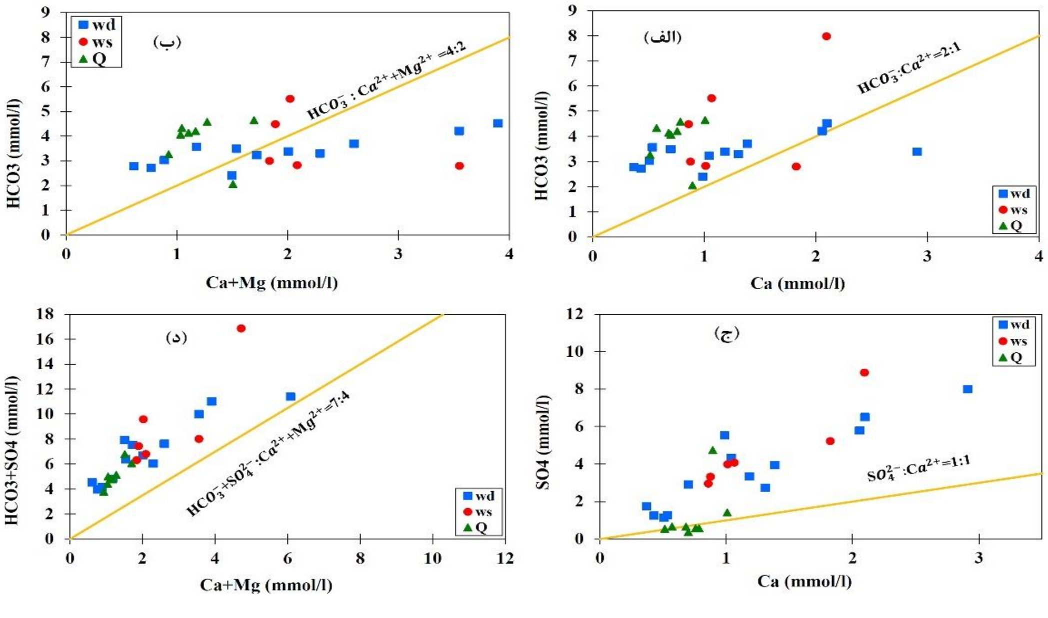
با توجه به نسبت‌های یونی می‌توان فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی را مشخص کرد. از نسبت مولی کلراید/سدیم می‌توان برای تعیین منشأ سدیم در آب‌های زیرزمینی استفاده کرد. در صورتی که نسبت مولی سدیم به کلراید بیشتر از یک باشد، سدیم از هوازدگی‌های سیلیکات نیز منشأ گرفته است و در صورتی که این نسبت کمتر از یک و یا نزدیک به یک باشد نشان‌دهنده انحلال نمک طعام است و معمولا در آب‌های شور دیده می‌شود. با توجه به شکل (۸) و رسم نمودار کلراید/سدیم در مقابل کلراید مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌ها در بالای خط ۱ قرار گرفته‌اند؛ لذا علاوه بر انحلال کانی هالیت، ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی تحت تأثیر هوازدگی سیلیکات و تبادل کاتیونی نیز می‌باشد. با توجه به نقشه پراکندگی نسبت کلراید/سدیم در منطقه (شکل ۸) مشاهده می‌شود که این نسبت در شرق منطقه بالا است و یک روند کاهشی از شرق به غرب منطقه دیده می‌شود. در واقع در جهت جریان آب زیرزمینی این نسبت کاهش می‌یابد و دلیل احتمالی آن می‌تواند هوازدگی کانی‌های رسی، فاضلاب‌های صنعتی و یا فعالیت‌های کشاورزی در شرق منطقه باشد. همچنین جهت تشخیص اثر کاتیونی، نسبت سدیم به کلسیم و سدیم به منیزیم (شکل ۸) ترسیم شد و مشاهده می‌شود این نسبت‌ها نیز افزایش یافته است. بنابراین تبادل کاتیونی در کاهش نسبت سدیم در جهت جریان آب زیرزمینی نقش چندانی نداشته است؛ بنابراین فقط انحلال هالیت و پلاژیوکلازها کنترل‌کننده میزان سدیم در آب زیرزمینی منطقه هستند. همچنین در بالادست منطقه مورد مطالعه کانی‌های پلاژیوکلاز سدیم‌دار نقش بیشتری در ورود سدیم به آب زیرزمینی دارند.

با توجه به رابطه مولی بیکربنات و کلسیم در شکل (۹)

می‌توان مشاهده کرد که اکثر نمونه‌ها در بالای خط ۲:۱ قرار دارند. لذا کانی‌های کربنات‌دار دیگری همانند دولومیت در آب زیرزمینی انحلال یافته است. نسبت مولی Ca +Mg در برابر HCO3 (شکل ۹) نشان می‌دهد بخشی از کربنات آب زیرزمینی از انحلال دولومیت حاصل شده است. با رسم نسبت مولی کلسیم در برابر سولفات (شکل ۹) مشاهده می‌شود بعضی از نمونه‌ها روی خط نسبت ۱:۱ قرار دارند؛ یعنی مقدار کلسیم با سولفات برابر و نسبت ۱:۱ دارند و نشان‌دهنده انحلال ژیپس است. در نمونه‌هایی که در پایین خط نسبت قرار دارند نشان‌دهنده این است که کلسیم از منشأهایی غیر از ژیپس مثل انحلال کانی کلسیت یا دولومیت نیز می‌تواند حاصل شده باشد. در نمونه‌های بالای خط نسبت ۱:۱ غلظت سولفات بیشتر از کلسیم بوده و کلسیم به احتمال زیاد بر اثر تبادل کاتیونی از محیط خارج شده است. نسبت مولی Ca +Mg و HCO3+SO4 (شکل ۹) نشان داد تمامی نمونه‌ها در بالای خط نسبت ۷:۴ قرار دارند و بیان‌کننده هوازدگی سیلیکات‌ها می‌باشند. تمام نمونه‌ها در بالای خط ۷:۴ قرار دارند که نشان‌دهنده انحلال کانی‌های کلسیت و دولومیت و در نتیجه افزایش یون‌های کلسیم و منیزیم می‌باشد.

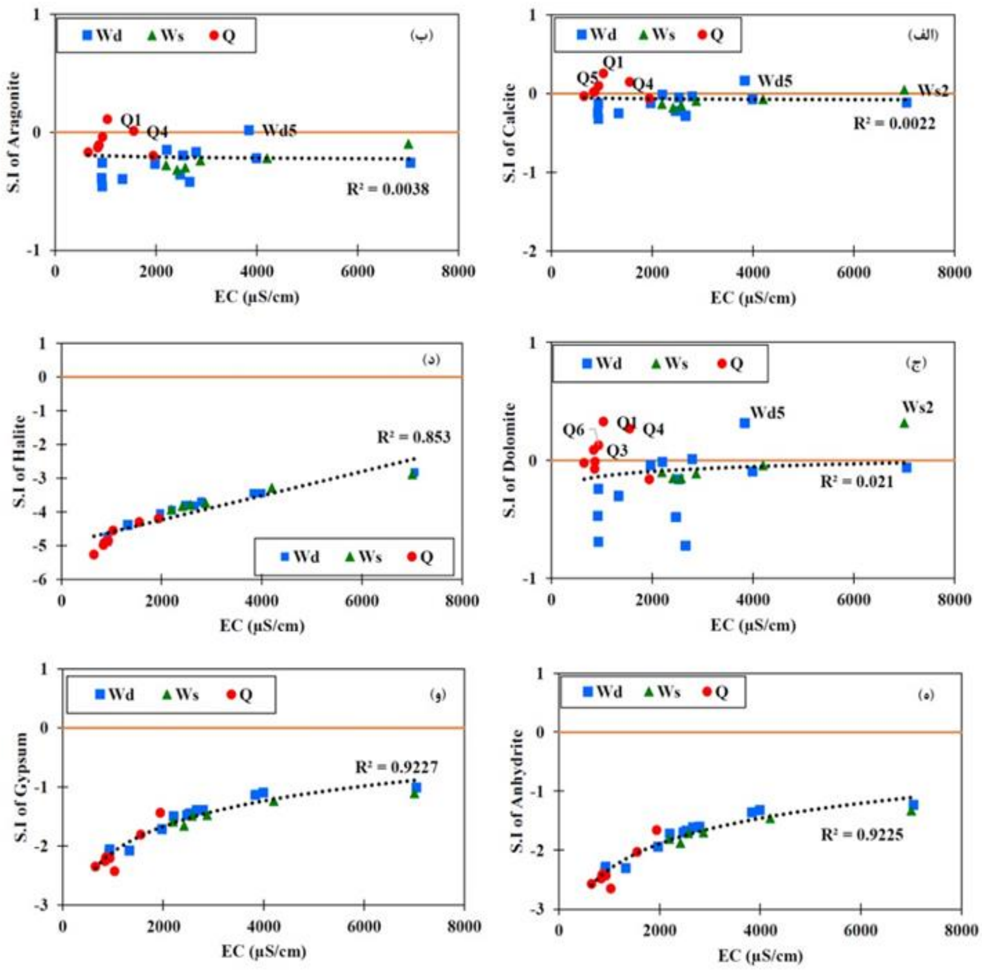


شکل ۸ نمودار نسبت مولی کلراید/سدیم در مقابل کلراید، نقشه پراکندگی این نسبت و نمودار نسبت منیزیم/سدیم و کلسیم/سدیم در مقابل کلراید نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه



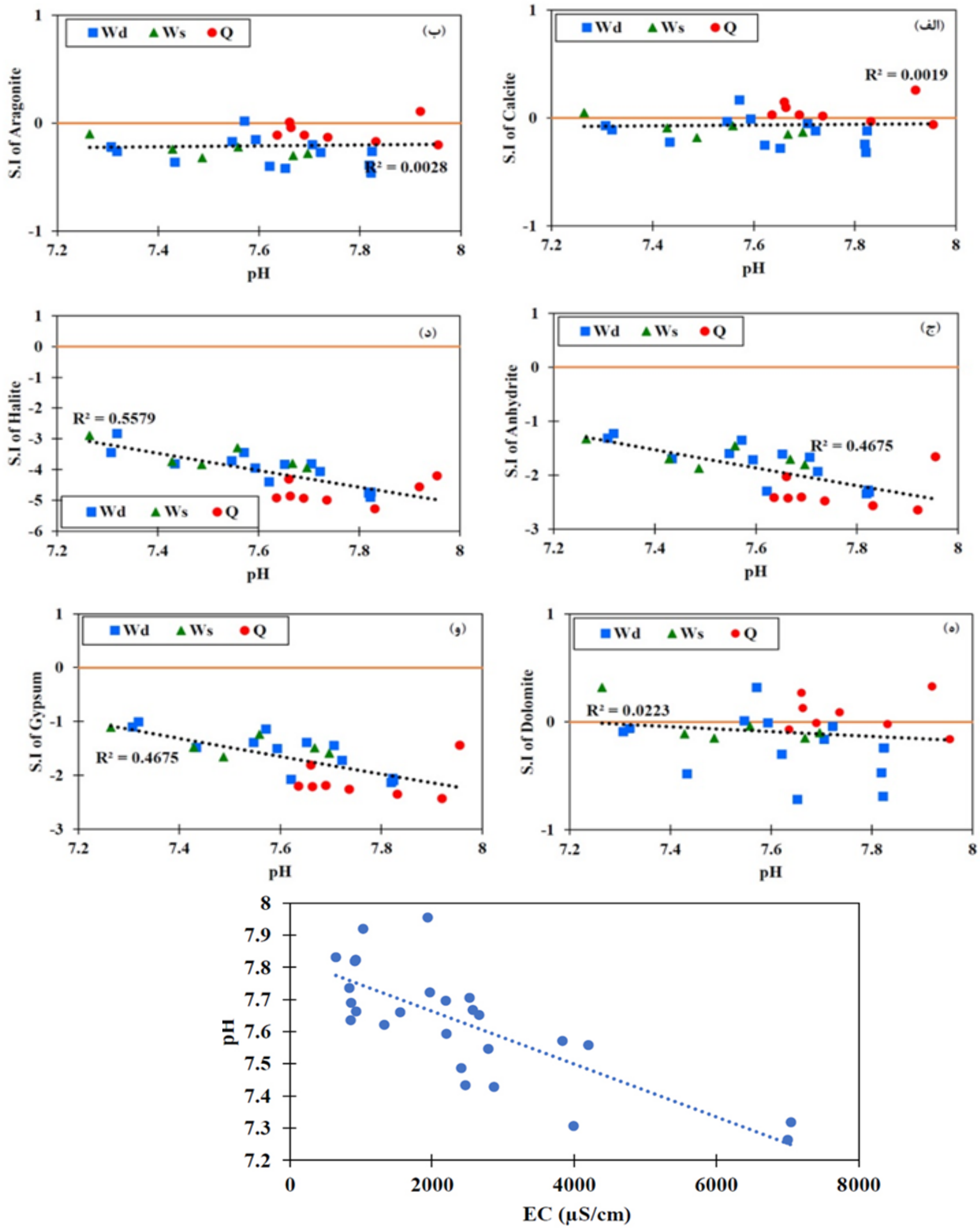
شکل ۹ نمودار نسبت‌های یونی مختلف نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

در شکل (۱۰) اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت، انیدریت، هالیت، دولومیت و ژیپس در مقابل هدایت الکتریکی ترسیم شده است. با توجه به اندیس اشباع کلسیت، مشاهده می‌شود که نمونه‌های چاه Wd5, Ws2, Q1, Q4, Q5 به صورت فوق اشباع، و بقیه نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند. افزایش یون کلسیم در نمونه‌های فوق اشباع از منشأهایی غیر از انحلال کلسیت مانند نقش کانی‌های رسی در تبادل کاتیونی و انحلال پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار، باعث فوق اشباع شدن آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. در نمودار اندیس اشباع آراگونیت مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها تحت اشباع می‌باشند و فقط Q1 به صورت فوق اشباع، و Wd5و Q4 به صورت اشباع می‌باشند که کانی آراگونیت در این دو نقطه اشباع تمایل به انحلال و رسوب‌گذاری دارد. همان طور که در نمودار اندیس اشباع دولومیت نشان داده شده است، نمونه‌های Q1, Q3, Q4, Q6, Wd5, Ws2 به صورت فوق اشباع هستند و منیزیم منشئی غیر از انحلال دولومیت مانند کانی‌های رسی و فلدسپاته، که باعث فوق اشباع شدن آب‌های زیرزمینی منطقه شده است؛ و بقیه نمونه‌ها به حالت تحت اشباع و یا اشباع در منطقه مشاهده می‌شوند که ممکن است به دلیل ته نشست دولومیت و یا خروج آن به صورت تبادل کاتیونی از آب‌های زیرزمینی منطقه باشد و اندیس اشباع دولومیت با افزایش هدایت الکتریکی در ابتدا افزایش یافته و سپس به حالت ثابت قرار گرفته است. به دلیل ته نشست رسوبات کربناته اندیس اشباع کانی‌های کلسیت و آراگونیت با افزایش هدایت الکتریکی به صورت ثابت است. در نهایت مشاهده می‌شود که نمودار اندیس اشباع هالیت، انیدریت و ژیپس تحت اشباع است و با افزایش هدایت الکتریکی اندیس اشباع این کانی‌ها هم افزایش پیدا می‌کند.



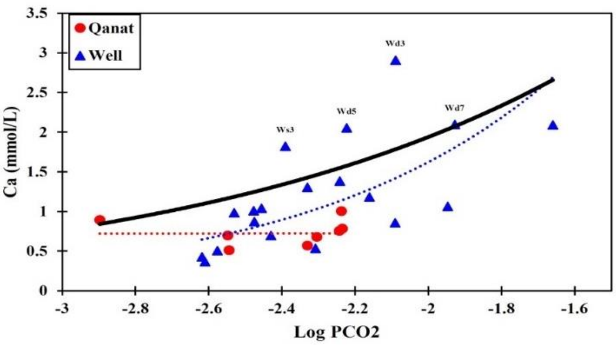
شکل ۱۰ اندیس اشباع محاسبه شده کانی‌های مختلف در مقابل هدایت الکتریکی نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

بررسی‌ها نشان می‌دهد اندیس اشباع کانی‌های کلسیت، آراگونیت و دولومیت چندان تحت تأثیر pH آب نبوده است (شکل ۱۱)؛ در حالی که اندیس اشباع کانی‌های هالیت، انیدریت و ژیپس با افزایش pH کاهش یافته است و از آنجایی که انحلال این کانی‌ها چندان وابسته به مقدار pH نیست، رخداد چنین حالتی معمول نمی‌باشد. جهت توجیه آن، مقادیر pH با EC هم در شکل (۱۱) ترسیم شده است. مشاهده می‌شود بین این دو پارامتر همبستگی منفی خوبی دیده می‌شود. از طرفی دیگر طیف pH خنثی تا قلیایی (۸) است و چندان سبب نمی‌شود که EC از حدود ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰ میکروزیمونس بر سانتی‌متر افزایش یابد. لذا احتمالا دلیل این رفتار هم‌زمانی افزایش EC و کاهش pH در جهت جریان آب زیرزمینی باشد. همان طور که در نقشه زمین‌شناسی و منابع آب دیده می‌شود در بالادست منابع قنوات تحت تأثیر واحدهای کربناته بوده و pH کمی قلیایی دارند و چاه‌های پایین‌دست در آبرفت، pH خنثی دارند. از طرفی دیگر به طور معمول در جهت جریان آب زیرزمینی در مسیر هیدروژئولوژیکی مقادیر TDS و EC افزایش می‌یابد و این سبب شده که pH و EC به ظاهر رابطه منفی خوبی داشته باشند.



شکل ۱۱ رابطه اندیس اشباع و EC با pH در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی اثر دی اکسید کربن در مقادیر کلسیم نمونه‌های آب با توجه به نحوه استخراج آب زیرزمینی (قنات و چاه)، منحنی رابطه بین فشار دی اکسید کربن (محاسبه شده) و غلظت کلسیم بر اساس معادله (۱) [12] در شکل (۱۲) ترسیم شده است.



شکل ۱۲ رابطه فشار دی اکسید کربن محاسبه شده در برابر غلظت کلسیم در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

$$m_{ca} = \sqrt[3]{10^{-6}\,[P_{CO_2}]/4} \qquad (۱)$$

خط تعادلی تئوری است در فشار ۱ اتمسفر، دما ۲۵ درجه و pH، ۷ نیز ترسیم شده است. از آنجایی که در شرایط واقعی میزان فشار، دما و pH در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه متفاوت است؛ مشاهده می‌شود که اکثر نمونه‌ها در پایین خط تعادلی فشار دی اکسید کربن قرار گرفته‌اند و در یک فشار دی اکسید کربن ثابت، میزان کلسیم در آب زیرزمینی منطقه کمتر از حالت تعادلی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود میزان فشار دی اکسید کربن در قنات‌های منطقه نسبت به چاه‌ها بسیار کمتر است. به نظر می‌رسد علت آن مکانیسم متفاوت استخراج آب زیرزمینی از قنات و چاه باشد. در چاه‌ها آب زیرزمینی از مسیر با فاصله کوتاهی‌تری پمپاژ می‌شود. در حالی که در قنوات، آب از مسیر طولانی کوره قنات خارج می‌شود؛ بنابراین در طول این مسیر، گاز دی اکسید کربن از آب خارج شده و میزان آن کم می‌شود در نتیجه این رخداد، یون کلسیم رسوب می‌کند. نمونه‌های Wd3, Wd5, Wd7, Ws3 در بالای خط تعادلی قرار گرفته‌اند و این نشان دهنده فوق اشباع بودن منابع آب در این چاه‌ها نسبت به یون کلسیم است.

نتیجه‌گیری

در منطقه مورد مطالعه نقشه هم پتانسیل و جهت جریان آب زیرزمینی نشان داد بخشی زیادی از آب زیرزمینی از واحدهای کربناته در شرق دشت وارد آبخوان شده و به سمت غرب منطقه حرکت می‌کند و طی این حرکت، کیفیت آب زیرزمینی منطقه کاهش پیدا کرده است. تکامل هیدروشیمیایی آب زیرزمینی نشان داد که تیپ آب زیرزمینی ورودی در شرق منطقه کربناته بوده، در نهایت به تیپ غالب کلرورسدیک تبدیل شده است. قرارگیری چاه‌های بهره‌برداری با نرخ پمپاژ بالاتر و هدایت الکتریکی زیاد در مرکز و سمت غرب آبخوان باعث افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است. بر اساس مقادیر تأخیر زمانی بین بارش و اثر آن در آب زیرزمینی می‌توان گفت جهت جریان آب زیرزمینی عمدتا از توپوگرافی منطقه تبعیت می‌کند و در مناطق شهری به دلیل کاهش نفوذپذیری و برداشت زیاد (ایجاد مخروط افت) و در پایین دست آبخوان به دلیل ذرات دانه ریزتر، این زمان تأخیر افزایش یافته است. در نهایت می‌توان گفت عوامل طبیعی زمین‌شناسی و برداشت از آب زیرزمینی هم‌زمان فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌باشند.

سپاسگزاری

از شرکت سهامی آب منطقه ای استان سیستان و بلوچستان سپاسگزاری می شود.

مراجع

[1] N. Aghazadeh, A. A. Mogaddam, "Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater in the Harzandat aquifer, Northwest of Iran," *Environmental monitoring and assessment*, vol. 176, no. 1-4, pp. 183-195, 2011.

[2] S. Karimi, Z. Mohammadi, N. Samani, "Evaluation of Hydrochemical Characteristics of Groundwater and Salinity Evolution in Semnan Plain," *Hydrogeology*, vol. 2, no. 1, pp. 1-19, 2017. (In Persian).

[3] J. Rozrokh, A. Asghari Moghaddam, A. A. Nadiri, “Investigation of hydrogeochemical characteristics and qualitative classification of Harzandat plain groundwater resources for various purposes, using hydrochemical methods,”. *Scientific and Research Journals Management System*, vol. 19, no. 5, pp. 77-92, 2017. (In Persian).

[4] S. Ahmadi, R. Jahanshahi, V. Moeini, S. Mali, “Assessment of hydrochemistry and heavy metals pollution in the groundwater of Ardestan mineral exploration area, Iran,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 77, n. 212, pp. 1-13, 2018.

[5] M. G. Mahmoodlu, N. Jandaghi, M. Sayadi, “Hydrochemical Evaluation and Qualitative Deterioration Assessment of Gorganrud River,” *Iranian Journal of Geology*, vol. 14, no. 55, pp. 129-145, 2020. (In Persian).

[6] M. S. Hosseini, R. Jahanshahi, N. Asadi, M. A. Nasiri, “Qualitative study of groundwater resources in the Hassanabad-Dehchah, Northeast of Neyriz, Fars province,” *Hydogeology*, vol. 5, no. 1, pp. 150-165, 2020.

[7] E. Fijani, S. Meysami, “Assessment of hydrochemical character ristics and groundwater suitability for drinking and irrigation purposes in Garmsar Plain, Iran,” *Geopersia*, vol. 13, no.1, pp. 83-102, 2023.

[8] L. Benadela, B. Bekkoussa, L. Gaidi, “Multivariate analysis and geochemical investigations of groundwater in a semi-arid region, case of superficial aquifer in Ghriss Basin, Northwest Algeria,” *Journal of Groundwater Science and Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 233-249, 2022.

[9] Sistan and Baluchestan Regional Water Authority, *Report of statistics and information of meteorological and hydrometric stations*, 2019.

[10] E. Fijani, S. Meysami, M. Mozafari, “Evaluation of Potential and the Amounts of Groundwater Recharge in the Garmsar Plain Aquifer Using Water Table Fluctuations and Piscopo Methods,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 1-18. 2023.

[11] M. Mozafari, M. Jamali Dizji, E. Fijani, R. Eskandari, “Estimation of hydraulic conductivity of Asaluyeh Aquifer using empirical equations based on particle size distribution,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 63-74. 2022.

[12] C. A. J. Appelo and D. Postama, *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd Reading, CRC press, Amsterdam, 2006.